Simulation des seuils de rentabilité économique de la méthode d'application localisée des doses de pesticides à l'échelle de l'exploitation pour des systèmes de grande culture en Haute-Normandie (France).

LLorens J-M [(1)] et Bourgain O. [(2)].
[(1)] Agrinovatech,(Mont Saint Aignan, France)
[(2)] LECOR, Laboratoire d'Economie Rurale, Esitpa, école d'ingénieur pour l'agriculture (Mont Saint Aignan, France)
jmllorens@agrinovatech.fr, obourgain@esitpa.org

Résumé

L'agriculture moderne nécessite de critères de décision à différentes échelles de territoire pour concilier productivité et respect de l'environnement. Notre échelle d'investigation finale est l'exploitation agricole. Nous avons établi une méthodologie pour étudier la rentabilité de la modulation des fongicides pour un système de culture à dominante céréalière en Haute-Normandie (France). Nous avons simulé les apports des produits phytosanitaires pour des surfaces d'exploitation variables (95 ha, 145 ha et 240 ha) et des taux d'hétérogénéité différents (minimum, moyen et maximum). Les marges directes calculées en application uniforme et en système modulé montrent que, dans nos conditions pédoclimatiques, la modulation des fongicides n'est pas économiquement rentable en tant que telle. Elle doit se concevoir dans le cadre d'un investissement global pour moduler l'ensemble des intrants.

Mots clefs : Stratégie de traitement phytosanitaire, modulation des fongicides, perspective économique. Analyse multicritère, politique agricole.

Introduction :
L'agriculture moderne nécessite de critères de décision à différentes échelles de territoire pour relever les deux grands défis actuels de nos systèmes de production agricole que sont le maintien de la productivité et le respect de l'environnement. La modulation des intrants à l'échelle intraparcellaire peut concilier ces deux défis, notamment pour les engrais (Bourgain et Llorens, 2009). Elle peut être utilisée pour de nombreuses actions techniques appliquées aux cultures : gestion des pesticides, des doses de semences ou de l'irrigation. Cependant dans la plupart des cas l'intérêt agro-environnemental se heurte à la rentabilité économique (Atherton et al, 1999) ou à des freins socio-économiques (Robert, 2002). Dans un contexte volontariste de diminution des doses de pesticides, il est important de pouvoir évaluer la rentabilité économique de ces technologies nouvelles.
La plupart du temps, ces résultats techniques sont évalués partiellement du point de vue économique. Ils se limitent au gain que représentait la diminution des quantités d'intrant ou marges brutes. De plus, ces expérimentations ont porté sur des cultures spécifiques, blé le plus souvent, (Duval et al,, 2007), ou maïs (Koch et al., 2004) et/ou un type d'intrant tel que l'azote en général (Dailey et al , 2006, De Vuyst and Halvorson, 2004 ; Koch et al, 2004 ; Link et al, 2006 ; Lobell, 2007). Cependant, compte tenu de la complexité de la tâche, peu de travaux se sont attachés à décrire les systèmes d'exploitation dans leur globalité (Sartori et al., 2005) et à évaluer la rentabilité globale des techniques de modulation des engrais (Haefele and Wopereis, 2005).
La méthode d'application localisée des pesticides est plus qu'une simple technologie, elle permet d'augmenter la pertinence des critères de décisions pour le conseil en agronomie (Swinton and Lowenberg-Deboer, 1998) ou sur des considérations environnementales

(Melakeberhan et avendano, 2008). Ainsi, il nous a paru important, dans ce travail, d'avoir cette vision globale à l'échelle de l'exploitation pour évaluer au mieux l'efficience économique de telles techniques. En effet, compte tenu du coût d'acquisition de l'information et du surcoût du matériel utilisé la rentabilité doit être évaluée pour un système de production qui cumule intérêts et limites pour chaque culture.

Un contexte politique volontariste : le Grenelle de l'environnement.

Les mesures du Grenelle de l'environnement préconisent de réduire de façon drastique toutes les pollutions diffuses et en particulier celles liées aux produits phytosanitaires.
Ces mesures concernent, tout d'abord, la protection de la ressource en eau (Grenelle de l'environnement, 2007a). Elles proposent de se fixer pour 2015 un objectif ambitieux en matière d'atteinte du bon état écologique pour 2/3 des masses d'eau de surface. Concernant toutes les pollutions diffuses (produits phytosanitaires, nitrates, PCB, métaux lourds…), il y a consensus pour la réduction de leur utilisation, de façon drastique pour les uns, progressive et significative pour les autres à condition de protéger l'agriculture et l'emploi agricole, pour réduire de façon drastique.
Il en découle pour certains produits l'interdiction pure et simple et pour d'autres une réduction de 50% de leur utilisation à moyen terme. Certains membres du groupe III (Instaurer un environnement respectueux de la santé) ont pensé que cette approche est partielle car ne prenant pas en compte l'évaluation bénéfices/risques ; ils ont estimé préférable d'améliorer et de développer de nouveaux itinéraires agricoles par la recherche et l'expérimentation sans indiquer de chiffrage a priori (Grenelle de l'environnement, 2007b). Ainsi afin d'assurer une cohérence d'action globale visant à établir une harmonie entre environnement et santé humaine le groupe III a proposé de développer une politique volontariste ambitieuse de substitution et d'innovation dans laquelle s'inscrit ce travail sur les applications potentielles de l'agriculture de précision pour réduire certains phytosanitaires.
Notre démarche est conforme à l'objectif des mesures du Grenelle de l'environnement qui est d'encourager le renouveau des démarches agronomiques, à travers une évolution de l'ensemble du système d'exploitation, obtenue notamment par des incitations économiques, tant positives que négatives, visant à encourager la mise en place à grande échelle d'une agriculture durable (Grenelle de l'environnement, 2007c).

Le potentiel d'impact d'une technique innovante telle que l'agriculture de précision.

L'agriculture de précision permet, en théorie, d'apporter la dose de pesticide nécessaire en fonction du potentiel du sol. Le critère agronomique de décision de traitement est la densité de plantes dans les zones à fort potentiel des parcelles qui conditionnant un risque plus élevé de développement des maladies. Ces zones doivent être traitées en priorité à 100% de la dose, des réductions sont possible sur les zones à plus faible potentiel. Cette diminution des doses se raisonne par rapport au risque qu'est prêt à prendre l'agriculteur, notamment dans le cas des fongicides.
Peu d'agriculteurs utilisent en routine des pulvérisateurs capables de moduler les doses. Peu de constructeurs en proposent dans leurs catalogues. Cependant, il est important d'avoir une vision prospective réaliste économiquement pour répondre aux demandes des agriculteurs sur le plan technique et à celles de décideurs politiques et de la société en général sur le plan environnemental.
Pour cette étude, nous avons appliqué une méthodologie similaire à celle que nous avions développée pour évaluer la rentabilité de la modulation des engrais en grande cultures (Bourgain et Llorens, 2009)et qui a montré que des diminutions de doses étaient compatibles avec le maintien des niveaux de rendements en Haute-Normandie. Nous nous sommes limités, à des sols limoneux sur sous sol calcaire, très fréquents dans la région. En effet, l'agriculture de précision doit se concevoir dans un contexte pédoclimatique défini. Dans notre cas, c'est la

réserve utile en eau qui est le moteur de l'hétérogénéité intraparcellaire du potentiel de rendement des cultures (Duval et al, 2007). Elle est mesurée grâce à l'électroconductivité apparente des sols. Les impacts techniques pour le blé et le colza sur les rendements sont fondés sur des essais expérimentaux menés par le GRCETA depuis 2003 (Duval et al, 2007).
Notre échelle d'investigation finale est l'exploitation agricole. Pour les cas types nous avons retenu des rotations comprenant au maximum sept à huit cultures différentes pour trois systèmes de cultures (céréales, betterave-lin, pomme de terre). Pour les exploitations réelles, ce sont des agriculteurs du GRCETA de l'Evreucin impliqués dans une démarche de développement de l'agriculture de précision dans l'Eure depuis 2003 qui ont fourni leurs données technico-économiques. Nous avons donc collecté des informations concernant les itinéraires techniques de chaque culture et les prix actualisés des intrants nécessaires. Nous avons utilisé soit des informations économiques standard représentatives des exploitations de la région, soit les informations réelles des exploitations. Les indicateurs économiques choisis sont principalement les coûts de production et la marge directe. Nous avons utilisé un logiciel de simulation économique « Olympe »[1] (Bourgain et Michaud, 2006) qui permet de travailler à différentes échelles d'information (parcelle, système de culture et exploitation).
La méthodologie ainsi établie a permis d'estimer des seuils de rentabilité des investissements en matériel nécessaire pour moduler les intrants pour certains systèmes de grandes cultures de Haute-Normandie en fonction de différents critères (le niveau d'hétérogénéité des sols, l'augmentation des surfaces d'exploitation, les variations de prix des pesticides et les diminution des doses).
Ainsi, les deux principaux objectifs de ce travail ont été, d'un part, de définir une méthodologie et des indicateurs technico-économiques pertinents pour approcher la rentabilité de l'agriculture de précision appliquée aux apports de pesticides à l'échelle de l'exploitation agricole. Et, d'autre part, de l'appliquer pour réaliser des simulations sur des cas-types et une exploitation réelle dont on maîtrise l'ensemble des informations économiques et comparer les résultats obtenus avec ou sans agriculture de précision.

Matériel et méthode

Echelle d'étude
Notre échelle d'investigation finale est l'exploitation agricole. Une partie des données techniques et économiques sont acquises expérimentalement à l'échelle de la parcelle (Duval et al, 2007 et bécu et al, 2008) puis elles sont agrégées au niveau de l'exploitation. Pour cela nous avons utilisé les résultats d'exploitations types issues d'un réseau d'observation économique mis en place par les chambres d'agriculture (chambre d'agriculture, 2008). Nous avons choisi de travailler avec les données des trois grands types de systèmes (céréalier, betteravier-liniculteur, patatier) présent en Haute-Normandie (Rosace, 2003). En effet ces exploitations de cultures représentent 40% des exploitations de la région. Elles sont définies comme étant sans productions de lait avec une surface toujours en herbe limitée (inférieure à 15% de la surface agricole utile) et un chiffre d'affaires animal inférieur à 15-20% du total. Dans ce travail, parmi cette typologie, nous avons choisi de simuler les seuils de rentabilité du système céréalier (systèmes de cultures C1a, C2 et C3, tableau 1). En effet c'était sur ces systèmes que nous possédions le plus grand nombre de données techniques aussi bien expérimentales que pratiques.

[1] Logiciel de simulation économique conçu par Jean-Marie Attonaty (Attonaty et al, 2005 ; Penot et Deheuvels, 2007).

Tableau 1 : **Cas types des systèmes de cultures (Rosace, 2003) utilisés dans les simulations de rentabilité économique de l'agriculture de précision en Haute-Normandie avec « Olympe ».**

Système	caractéristique dominante	Nombre d'UTH	Surface moyenne (ha)	Cas type
Céréalier	plus de 80% des terres labourables en céréales-oléoprotéagineux + jachère	1	**95** (70-120)	C1a
		2	**145** (120-180	C2
		2	**240** (180-350)	C3
betteravier - liniculteur	20 à 25 % des terres labourables en bettraves et lin	1	**110** (80-140)	BL1bis
		2	**200** (140-350)	BL2bis
Patatier conso	Plus de 10 ha de pomme de terre de consommation (Moyenne 25 ha)	2 ou plus	150 (plus de 90)	PT conso

Cette typologie repose sur trois niveaux combinés de facteurs (cf. Tableau 1) :

- le pourcentage de surface en céréales et oléoprotéagineux, en betterave et lin, en pomme de terre.
- La main d'œuvre,
- L'importance de surface agricole utile.

Les six systèmes représentés regroupent 87% des exploitations de cultures de Haute-Normandie soit 2800 fermes. Nous avons utilisés des informations économiques standards représentatives des exploitations de la région. Elles sont la synthèse de six années de références.

Référentiel technique

Nous avons retenu des rotations comprenant cinq cultures différentes (cf. tableau 2). Nous avons donc collecté des informations concernant les itinéraires techniques de chaque culture, les prix actualisés des intrants nécessaires (CER France, 2009) et le coût des opérations culturales.

Les rendements des cultures de blé et de colza en fonction des variations intraparcellaire ont été évalués sur la base de données et de modélisation acquises antérieurement lors d'essais agronomiques (Duval et al, 2007 et Bécu et al, 2008). Pour les autres cultures (orge et pois), ils ont été estimés à partir d'avis d'expert de différents instituts techniques.

Les techniques de résistivité et de conductivité électrique (EM38) ont été utilisées pour caractériser l'hétérogénéité intraparcellaire.

Les doses de fongicides appliqués varient en fonction de l'hétérogénéité des sols. Nous avons défini trois zones à potentiel de rendement différent[2] (fort, moyen et faible) sur la base des mesures de conductivité électrique des sols (cf. Figure **2**). Les différentes zones à traiter

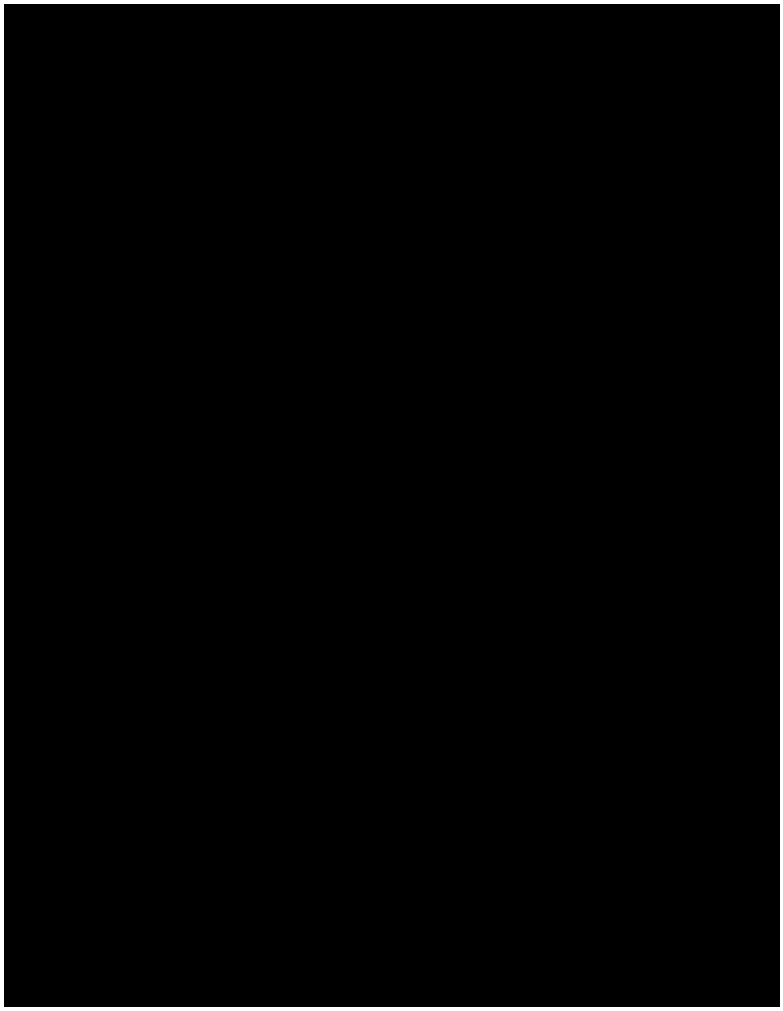
[2] Pour le blé et dans nos conditions pédoclimatiques, des rendements supérieurs à 95 qx/ha sont considérés comme étant forts. Quand ils sont compris entre 75 et 95qx/ha, ils seront moyens. Nous considérons comme faibles des rendements inférieurs à 75 qx/ha (cf. figure 2)

conditionnent l'application des deux stratégies de réduction des doses de fongicides. En effet, dans les zones à fort rendement la biomasse est plus importante et les conditions climatiques sous le couvert de végétation est plus propice au développement des maladies et nous appliquerons la dose maximale de traitement (100%). Dans les zones à rendement moyen, nous appliquerons 90% ou 80% de la dose maximale suivant la stratégie. Dans les zones à faibles rendement les réductions de doses atteindrons 80% ou 60% de la dose maximale.
Les deux stratégies de traitement testées ici sont donc :

- Stratégie 1 : 100% (dose totale), 90% et 80%,
- Stratégie 2 : 100% (dose totale), 80% et 60%.

Les traitements fongicides concernés (cf. Tableau 2) sont ceux appliqués sur Blé (T1, T2, T3) et sur orge (T1, T2). Les références techniques des produits utilisés (prix et doses) sont issus des documents utilisés dans le conseil agricole en Seine-Maritime (fertil info, 2009).

Tableau 2 : **Itinéraires techniques des cultures en systèmes céréaliers en Haute-Normandie (fertil info, 2009)**



Indicateurs économiques
Les indicateurs économiques choisis sont principalement les coûts des intrants, des frais de mécanisation spécifiques à la l'application des phytosanitaires et la marge directe (marge brute – les charges de structures spécifiques à la production).
Dans notre cas, cette dernière est calculée de la manière suivante :

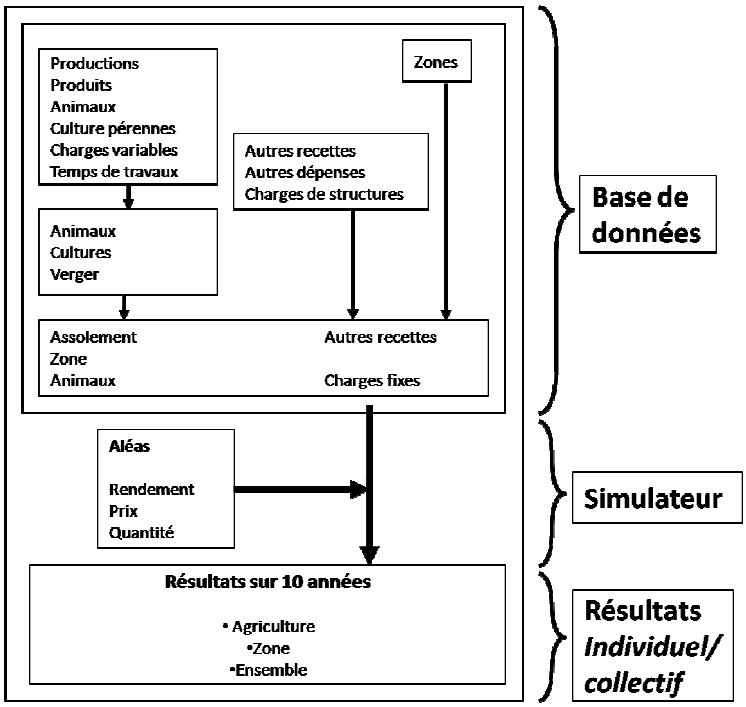
Produit des cultures (PC) = rendement*prix de vente + primes directes aux cultures.
Charges opérationnelles et de structures spécifiques phytosanitaires (COSSP)= intrants (engrais, semences, phytosanitaires) +pulvérisateur (charges fixes et de fonctionnement) + matériel de positionnement (GPS, logiciel, boitier) + maintenance + débitmètre+ capteur de pression+montage du matériel de modulation
Marge directe (MD) = PC – COSSP
Le matériel de pulvérisation pouvant varier selon les pratiques (uniforme ou modulation) nous avons choisi de retenir cette charge spécifique. Les résultats sont issus du référentiel « Coûts d'utilisation prévisionnels des matériels agricoles » (Chambre d'Agriculture de Normandie, BCMA et CUMA, 2008)
Les coûts des matériels embarqués spécifiques à la modulation proviennent de Défisol27 (communication personnelle), les amortissements ont été calculés sur 5 ans.
Les charges liées aux intrants ont été établies par hectare de cultures, celles liées aux matériels spécifiques pour la pulvérisation et la modulation des fongicides ont été affectées à l'ensemble des surfaces (excepté les coûts d'entretien du pulvérisateur ramenés à l'hectare de culture modulée). Ainsi, ces dernières seront donc moins importantes quand les surfaces augmenteront.
Ce choix d'affectation des charges spécifiques à l'ensemble des surfaces a été motivé par deux critères principaux : d'une part une volonté d'avoir une approche globale de la rentabilité au système d'exploitation, d'autre part, dans une perspective d'appliquer à d'autres cultures cette modulation des fongicides.

Simulations économiques
Nous avons utilisé un logiciel de simulation économique « Olympe » qui permet de travailler à différentes échelles d'information (parcelle, système de culture et exploitation). Il s'agit d'un outil d'aide à la décision composé d'une base de données et d'un simulateur (figure 1). Il permet de construire des variantes et de les comparer. Dans notre cas, nous avons quatre variantes:

- Trois doses de fongicides appliqués en fonction de l'hétérogénéité des sols.
- Deux stratégies de réduction des doses de fongicides appliqués.
- Cinq niveaux de prix de fongicides.
- Trois dimensions de systèmes de production.

Les deux premiers points ont été définis dans le référentiel technique. Nous avons constaté une augmentation du prix des fongicides de 9,3% depuis 2005 (Agreste, 2010). Nous avons voulu simuler une évolution croissante des prix jusqu'à leur doublement (10%, 30%, 50% et 100%). En effet, selon Gilles Couleaud d'Arvalis, si l'on veut voir l'application des produits phytosanitaires diminuer de 40%, il serait nécessaire d'en doubler le prix (Couleaud , 2009). Il était donc indispensable de faire varier le prix des fongicides afin de définir des seuils de rentabilité à partir des hypothèses retenues si on voulait tendre vers les objectifs définis lors du Grenelle de l'environnement. Pour la dernière variante, les trois surfaces agricoles utiles testées (95 ha, 145 ha et 240 ha) sont imposées par le référentiel ROSACE (tableau 1).

Figure 1 : **Olympe un outil de recherche d'aide à la décision en économie qui est à la fois une base de données et un simulateur (Attonaty et al., 2005).**



Pour simuler la rentabilité économique de matériel permettant de moduler les pesticides dans les systèmes de grandes cultures les plus courants en Haute-Normandie, nous avons du prendre des hypothèses de calcul :

- Les seuls intrants qui sont pris en compte en termes de variables dans les simulations sont les quantités de fongicides sur blé et orge. Le coût du pulvérisateur retenu est identique en agriculture uniforme et en agriculture de précision. Les agriculteurs et conseillers rencontrés dans le cadre de notre collaboration avec Défisol27 ont indiqué qu'il n'y avait pas actuellement de différence de matériel utilisé. Le surcoût observé proviendra donc du matériel électronique embarqué spécifique à la modulation et du montage de celui-ci.
- Nous avons fait varier les pourcentages de surface en termes de potentiel agronomique à l'intérieur des parcelles en se fondant sur les mesures de conductivité qui traduisent la réserve utile des sols qui est le facteur limitant principal dans nos conditions pédoclimatiques (Duval et al, 2007).

Résultats et discussion

Notre champ d'investigation : les systèmes céréaliers de Haute-Normandie.

Le Tableau 3 présente les assolements moyens des trois systèmes de culture représentatifs de Haute-Normandie, ainsi que les surfaces concernées dans les systèmes céréaliers. Dans ces derniers qui sont l'objet de notre étude, les prairies ne sont pas considérées comme faisant partie de la rotation. De même, elles ne sont pas concernées par la modulation des pesticides. Ainsi, les charges qui leur sont appliquées sont les mêmes que l'application soit modulée ou pas.

Tableau 3 : **Assolements moyens des systèmes de cultures en Haute-Normandie (en %) et assolements moyens des systèmes céréaliers supports de la simulation (en ha).**

Système haut-normands	Assolement moyen en 2001 (en %)								
	blé	bett	lin	pdt	Prairie	colza	Pois	Esc	Jac
bett - lin	40	14	12		7		11	8	8
Patatier	42	7	13	17	7		7		7
Céréalier	52				6	18	10	14	
Système céréalier	Assolement moyen en 2001 (en ha)								
	blé	bett	lin	pdt	Prairie	colza	Pois	Esc	Jac
C1a (95 ha)	49				6	17	10	13	
C2 (145 ha)	75				9	26	15	20	
C3 (240 ha)	125				14	43	24	34	

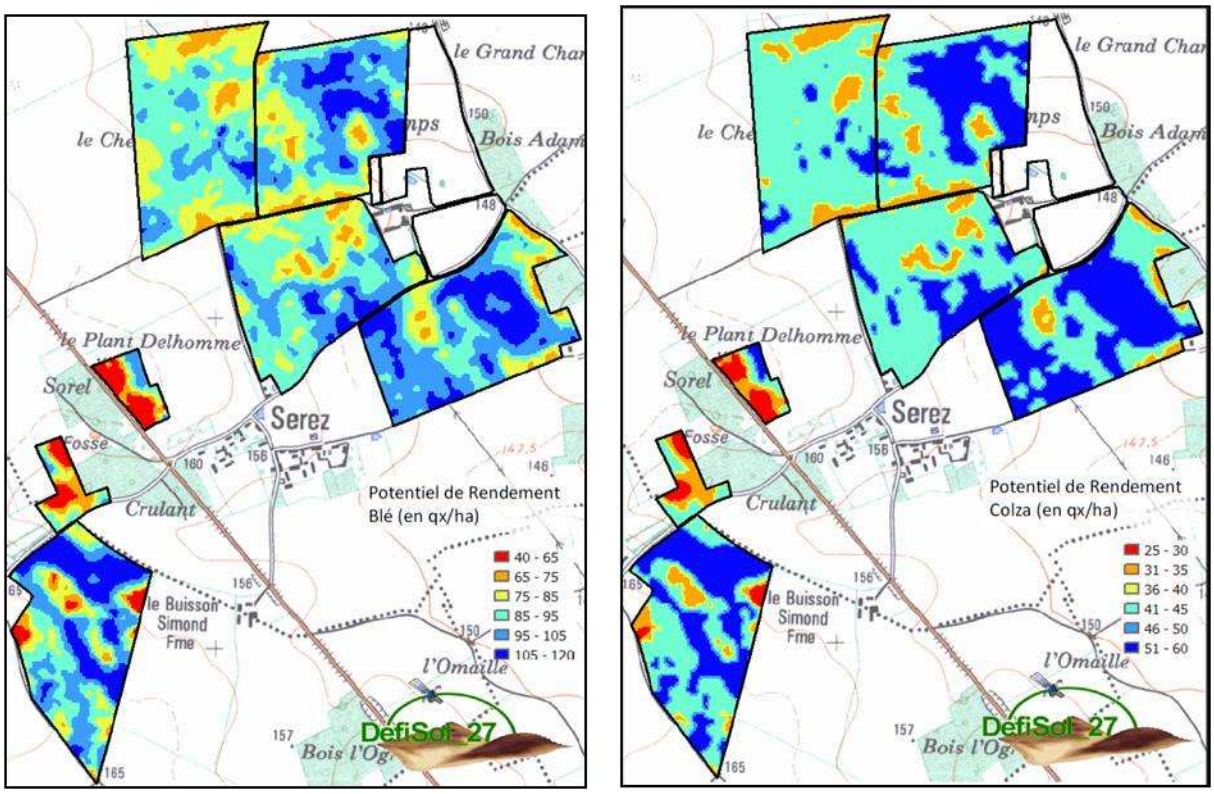
Les sols de Normandie sont parmi les plus riches en termes de potentiel de rendements en France. En particulier les sols de limons qui peuvent atteindre des profondeurs importantes (Duval et al, 2007). Ainsi, la combinaison des cultures et des rotations permet d'observer des systèmes de cultures très variés (cf. tableau 2). La rentabilité technico-économique de l'application localisée des pesticides est donc très complexe à aborder à l'échelle de l'exploitation agricole. Nous avons focalisé notre étude sur les systèmes céréaliers parce que le nombre de cultures à analyser était le plus faible et que nous disposions de trois niveaux de surfaces différents.

Des sols de limons avec des potentiels de rendement élevés mais caractérisés par une importante variabilité intraparcellaire.

Les sols de limons de Haute-Normandie sont caractérisés par des potentiels de rendements moyens élevés. Cependant cette moyenne cache des diversités importantes au sein d'une même parcelle. Les mesures d'électroconductivité des sols traduisent les variations de profondeur du sol qui ont une influence sur la quantité d'eau disponible pour les plantes qui affectent le rendement. Cette profondeur peut varier dans la même parcelle de 50cm (avec une charge en cailloux qui peut monter jusqu'à 50%) à un sol de plus de deux mètres de limons francs sans aucun cailloux. Cette hétérogénéité se traduit par des potentiels de rendements très variables, comme on peut le voir sur le parcellaire de la figure 2 pour le blé et le colza. Les potentiels les plus faibles (en rouge) se situent entre 40 et 65 quintaux pour le blé et 25 à 30 pour le colza. Les plus forts dépassent 105 quintaux en blé et 50 quintaux en colza. Ainsi dans ces parcelles de limons on peut varier du simple au double en termes de rendement (cf. figure 2).

A ces potentiel de rendement sont associées des biomasses végétatives variables et donc des risques plus fort de développement des maladies dans les zones où la biomasse est la plus élevée (90 à 120 qx/ha en blé sur la figure 2). Il faudra donc appliquer, dans ces zones, la dose nécessaire la plus élevée (100 %) pour protéger la culture. A contrario, dans les zones ou les rendements sont les plus faibles (40 à 75qx/ha en blé sur la figure 2), la biomasse est moins élevée et il est possible de réduire au maximum les doses (60% ou 80% suivant la stratégie retenue). Dans les zones intermédiaires (75 à 95 qx/ha en blé sur la figure 2) on appliquera la dose diminuée de 10 ou 20%.

Figure 2 : **Cartes de potentiels de rendement en blé et en colza fondées sur les mesures d'électroconductivité apparente des sols de limons en Haute-Normandie (Défisol27, Communication personnelle).**



Nous avons ainsi classé les sols en trois niveaux de potentiel de rendement que nous avons entré dans la base de données (Figure **2**). Pour chaque niveau de rendement nous avons défini trois niveaux d'hétérogénéité des parcelles (Tableau 4) fondés sur les résultats les plus fréquemment rencontrés, dans notre région, sur une durée de 6 années d'expérimentation (70 agriculteurs et 9000 ha analysés) par le GRCETA, (Bécu, données non publiées).

Tableau 4 : **Hypothèses concernant trois niveaux d'hétérogénéité des sols en Haute-Normandie (moyen, minimum et maximum) en relation avec la profondeur des sols et les trois niveaux de potentiel de rendement en terme de rendement des cultures qui en découlent (Mauvais, moyen et bon)**

Sols de Haute-Normandie		Pourcentage de la surface concerné		
		Faible potentiel	Potentiel moyen	Fort potentiel
Hétérogénéité	maximum	17%	58%	25%
	moyenne	12%	68%	20%
	minimum	8%	74%	18%

Ce raisonnement par classes est la base du calcul des quantités de fongicides à apporter. Afin d'illustrer cette méthodologie nous avons détaillé la démarche pour le calcul des quantités de Bravo500 apportées sur blé (stratégie 2 : 100-80-60) pour une exploitation de 95 hectares dans le tableau 4.

Nous avons obtenu les quantités et le coût total de l'apport de ce fongicide pour le blé en fonction des surfaces concernées par l'hétérogénéité des parcelles : Hétérogénéité maximum et moyenne (40 l épandus pour un coût de 280 €) et hétérogénéité minimum (40,2 kg épandus

pour un coût de 281,4 €). Les valeurs obtenues sont sensiblement les mêmes. Elles sont même égales pour les hétérogénéités moyenne et maximum. Ce qui diffère c'est la répartition des quantités qui sont ajustées aux besoins de la plante : il y a moins de Bravo500 épandus dans les zones où il sera le moins valorisé et des doses maximales dans celles où il protègera mieux le blé.
Donc, dans cet exemple, pour les apports de fongicide sur blé dans le cas d'une exploitation de 95 hectares on a:

- Du point environnemental une limitation la pollution diffuse en produit phytosanitaire dans les zones ou cela ne s'impose pas.
- Du point de vue agronomique une protection plus adaptée de la culture.

Du point de vue économique nous allons dans le sens d'une meilleure rentabilité due à un coût moins important lié aux moindres quantités épandues par rapport à l'application uniforme (40 litres au lieu de 49 dans notre exemple).

Tableau 5 : **Exemple de calcul des quantités de Bravo500 à apporter sur blé pour une exploitation de 95 hectares en fonction de la variation des taux d'hétérogénéité des sols et des potentiels de rendements**

Culture	Fongicide	Hétérogénéité des sols		Potentiel de rendement	Répartition des surfaces (ha)	Quantité de produit (en l)	prix (€/l)	coûts (€)
Blé (surface = 49 ha) SAU (95 ha)	Bravo 500 Stratégie 2	Maximum	25%	Fort	12	12	7	84,0
			58%	Moyen	29	23,2	7	162,4
			17%	Faible	8	4,8	7	33,6
		Moyenne	20%	Fort	10	10	7	70,0
			68%	Moyen	33	26,4	7	184,8
			12%	Faible	6	3,6	7	25,2
		Minimum	18%	Fort	9	9	7	63,0
			74%	Moyen	36	28,8	7	201,6
			8%	Faible	4	2,4	7	16,8

Des quantités de fongicides qui diminuent quand on module les apports sur céréales.
Contrairement à l'étude précédente (Bourgain et Llorens, 2009), la modulation des apports de fongicides ne génère pas de variations de rendement. Ces dernières sont conditionnées essentiellement par la réserve en eau et la nutrition minérale : elle détermine des zones intraparcellaires à potentiel variable. Par souci de simplification, nous avons voulu nous concentrer sur la problématique « pesticides », indépendamment des apports localisés des engrais qui, eux, génèrent des différences de rendement donc des variations de produits en fonction de l'hétérogénéité des parcelles.
Quand on compare les quantités de fongicides appliquées en agriculture uniforme et celles appliquées de manière localisée, elles diminuent d'environ 10% pour la stratégie de réduction des doses N°1 (100-90-80) et d'environ 20% pour la stratégie de réduction des doses N°2 (100-80-60). Ceci s'explique par le fait que les niveaux d'hétérogénéité sont centrés sur la dose 90 pour la stratégie 1 et sur la dose 80 pour la stratégie 2. En effet, la part de zone à potentiel moyen varie entre 58% et 74% de la surface des parcelles (cf. Tableau 3). Du fait des faibles quantités de produits en jeu, les différences entre niveau d'hétérogénéité (minimum, moyenne ou maximum) sont quasiment inexistantes contrairement à ce que l'on observait pour la modulation des engrais (Bourgain et Llorens, 2009).

Il est à noter que, techniquement, seule la stratégie 1 est réalisable à l'heure actuelle avec le matériel disponible sur le marché. La stratégie 2 nécessiterait que la technique évolue en termes de possibilité de réduire le débit au niveau des buses. Nous avons souhaité simuler cette hypothèse car elle est agronomiquement concevable, même si elle implique une prise de risque de la part de l'agriculteur en fonction du climat de l'année, de la variété utilisée ou de l'intensité du développement des maladies fongiques. Ce risque a été évalué à 10 à 15% de rendement en moins (Poletti, communication personnelle)

Des marges brutes améliorées mais des marges directes détériorées.

Pour les prix de 2009, l'application localisée des fongicides améliore la marge brute globale par hectare de l'exploitation grâce à l'amélioration de la marge des céréales de 5 €/ha pour la stratégie 1 et de 10 €/ha pour la stratégie 2. Dans la logique de ce que nous avons observé avec l'évolution des quantités épandues, les différents niveaux d'hétérogénéité n'ont pas d'influence sur la variation de la marge brute.

En raisonnant à l'échelle de l'exploitation le gain de marge brute minimal (stratégie 1) est de 453 € pour 95 ha et le gain maximal (stratégie 2) est 2379 € pour 240 ha. Ces sommes sont très marginales par rapport à la marge brute totale, elles en représentent 1 à 2%.

L'hypothèse du doublement des prix induit un doublement du gain de marge puisqu'il s'agit d'une variation des prix des fongicides impliqués dans la modulation.

Tableau 6 : **Variations des marges brutes (en €/ha) de SAU entre agriculture uniforme et application localisées des fongicides en fonction de la surface des systèmes céréaliers, des niveaux d'hétérogénéité des sols et des stratégies d'application des doses**

Marges Brutes/ha SAU				Prix 2009	+ 10 %	+ 30 %	+ 50 %	100%
Stratégie 1: 100-90-80	Application Uniforme	marges brutes €/ha SAU	95ha	468	463	452	441	414
			145ha	468	463	452	441	414
			240ha	469	464	453	442	414
	Agriculture de précision : Variation de marges brutes €/ha SAU	Hétérogénéité Minimale	95ha	+ 5	+ 5	+ 6	+ 8	+ 9
			145ha	+ 5	+ 5	+ 6	+ 8	+ 9
			240ha	+ 5	+ 5	+ 7	+ 8	+ 10
		Hétérogénéité Moyenne	95ha	+ 5	+ 5	+ 6	+ 8	+ 9
			145ha	+ 5	+ 5	+ 6	+ 8	+ 9
			240ha	+ 5	+ 5	+ 7	+ 8	+ 10
		Hétérogénéité Maximale	95ha	+ 5	+ 5	+ 6	+ 8	+ 9
			145ha	+ 5	+ 5	+ 6	+ 8	+ 9
			240ha	+ 5	+ 5	+ 7	+ 8	+ 10
Stratégie 2: 100-80-60	Application Uniforme	marges brutes €/ha SAU	95ha	468	463	452	441	414
			145ha	468	463	452	441	414
			240ha	469	464	453	442	414
	Agriculture de précision : Variation de marges brutes €/ha SAU	Hétérogénéité Minimale	95ha	+ 10	+ 10	+ 13	+ 15	+ 19
			145ha	+ 10	+ 10	+ 13	+ 15	+ 19
			240ha	+ 10	+ 11	+ 13	+ 15	+ 20
		Hétérogénéité Moyenne	95ha	+ 10	+ 10	+ 13	+ 15	+ 19
			145ha	+ 10	+ 10	+ 13	+ 15	+ 19
			240ha	+ 10	+ 11	+ 13	+ 15	+ 20
		Hétérogénéité Maximale	95ha	+ 10	+ 10	+ 13	+ 15	+ 19
			145ha	+ 10	+ 10	+ 13	+ 15	+ 19
			240ha	+ 10	+ 11	+ 13	+ 15	+ 20

Pour les prix de 2009, les techniques d'application localisée des fongicides améliore la marge brute, cependant la prise en comptes du coût des matériels spécifiques entraine une variation de marge nette négative. Par rapport à l'application uniforme les charges de structure spécifiques augmentent de 3290 €. Le gain faible de marge brute est insuffisant pour couvrir le surcoût du matériel. Le différentiel de marge directe est d'autant plus faible que la surface est importante, le surcoût lié à l'utilisation de ce matériel étant supporté par une plus grande surface (de -30 € à -3 € suivant les stratégies et les systèmes de production).

Dans les conditions de nos hypothèses de travail où nous ne nous intéressons qu'à la modulation des fongicides sur céréales en dehors de tout autre intrant, l'agriculture de

précision n'est pas rentable en 2009. Dans le cadre de la stratégie 2 et pour les surfaces les plus élevées (240 ha), une évolution des prix des fongicides, permet d'atteindre l'équilibre pour des augmentations de 30 à 50 % (cf. Tableau 7) et d'obtenir un gain de marge directe de l'ordre de 6 €/ha de SAU quand on double leur prix. Ainsi, l'application localisée des fongicides sur céréales ne devient rentable économiquement qu'avec un prise de risque non négligeable en termes de stratégie de traitement et que pour des exploitations céréalières de dimension importante. Ces résultats sont aussi à nuancer vis-à-vis du surcoût du matériel capable de diminuer les doses à 60% (buses) qui n'a pas été pris en compte par souci de simplification des simulations dans le cadre de cette première approche de l'étude de la rentabilité. Cependant, envisagée sous l'angle environnemental, l'amélioration est sensible. Les traitements ne seront réalisés que dans les zones où cela est nécessaire, on évitera ainsi des perturbations sur la biodiversité du sol dans ces zones (Brussaard et al, 2007). Ces techniques s'inscrivent néanmoins dans les objectifs du Grenelle de l'environnement et des réductions des doses de pesticides.

Tableau 7 : **Variations des marges directes (en €/ha) de SAU entre agriculture uniforme et application localisées des fongicides en fonction de la surface des systèmes céréaliers, des niveaux d'hétérogénéité des sols et des stratégies d'application des doses**

Marges Directes/ha SAU				Prix 2009	+ 10 %	+ 30 %	+ 50 %	100%
Stratégie 1: 100-90-80	Application Uniforme	marges directes €/ha SAU	95ha	420	415	404	394	366
			145ha	437	432	421	410	383
			240ha	450	445	434	424	396
	Agriculture de précision : Variation de marges directes €/ha SAU	Hétérogénéité Minimale	95ha	-30	-29	-28	-28	- 25
			145ha	-18	-18	-16	-15	- 13
			240ha	-8	-8	-7	-7	- 4
		Hétérogénéité Moyenne	95ha	-30	-29	-28	-28	-25
			145ha	-18	-18	-16	-15	- 13
			240ha	-8	-8	-7	-7	- 4
		Hétérogénéité Maximale	95ha	-30	-29	-28	-28	- 25
			145ha	-18	-18	-16	-15	- 13
			240ha	-8	-8	-7	-7	- 4
Stratégie 2: 100-80-60	Application Uniforme	marges directes €/ha SAU	95ha	420	415	404	394	366
			145ha	437	432	421	410	383
			240ha	450	445	434	424	396
	Agriculture de précision : Variation de marges directes €/ha SAU	Hétérogénéité Minimale	95ha	-25	-24	-22	-20	- 16
			145ha	-13	-12	-10	-8	- 4
			240ha	-3	-3	-1	1	+ 5
		Hétérogénéité Moyenne	95ha	-25	-24	-22	-20	- 15
			145ha	-13	-12	-10	-8	- 4
			240ha	-3	-3	-1	1	+ 6
		Hétérogénéité Maximale	95ha	-25	-24	-22	-20	- 15
			145ha	-13	-12	-10	-8	- 4
			240ha	-3	-3	-1	1	+ 6

Discussion générale et perspectives

Nous nous sommes limités dans cette étude à évaluer la rentabilité des fongicides sur céréales pour plusieurs raisons. En effet, nous voulions :

- Donner des réponses économiques à des techniques utilisables par les agriculteurs avec les matériels existant actuellement chez les concessionnaires.
- Utiliser des raisonnements techniques appliqués dans notre région.
- Nous limiter aux fongicides sur céréales car il n'était pertinent agronomiquement de les appliquer sur colza ou pois.
- Nous placer dans l'hypothèse d'une exploitation agricole voulant investir dans ce type de matériel.

Dans ces conditions, l'application localisée des fongicides n'est pas rentable en tant que telle, principalement à cause de l'investissement du matériel qui est difficilement amortissable. Cependant, il y a deux voies qui n'ont pas été explorées et qui peuvent augmenter la

rentabilité de cette démarche. La première est l'application sur des surfaces beaucoup plus grandes en mutualisant les outils entre plusieurs exploitations. La seconde est de concevoir la modulation des fongicides dans le cadre d'une application localisée de l'ensemble des intrants à l'échelle de l'exploitation, nos précédents travaux (Bourgain et Llorens, 2009) ayant montré que la modulation des engrais améliorait la marge directe (entre 35 et 45 €/ha).
L'autre marge de progrès dans la réduction des pesticides en agriculture de précision est le contrôle des adventices. Cependant, cela ne concerne que les traitements qui se font en post-levée (cf. Tableau 2) puisqu'il faut pouvoir cartographier les zones où sont les mauvaises herbes (Normeyer, 2006). Une des perspectives de ce travail est de simuler la réduction des herbicides grâce à l'application localisée. Cependant les matériels disponibles ne sont pour le moment que des prototype de recherche que ce soit pour la détection des plantes (Burgos-Artizzua et al, 2009) ou pour le traitement localisé qui devra être beaucoup plus précis (Slaughter et al, 2008) que pour les fongicides si on veut avoir des diminutions significative des doses. Le transfert de technologies concernant la lutte localisée contre les adventices reste à réaliser pour être opérationnel chez les agriculteurs (Normeyer, 2006, Slaughter et al, 2008, Burgos-Artizzua et al, 2009).
L'évolution vers la réduction des pesticides grâce aux techniques d'agriculture de précision prendra du temps car il reste donc des aspects techniques à résoudre, mais pour autant il faut enclencher un processus dès à présent en agissant à trois horizons :
- Pour le long terme (10 à 15 ans), en lançant dès à présent des programmes de recherche permettant de repérer (développement de capteurs spécifiques des adventices des cultures (Burgos-Artizzua et al, 2009) et des maladies) et de traiter de manière plus précise (Slaughter et al, 2008) les zones concernées (développement de pulvérisateurs permettant de traiter sur des zones moins larges ou avec plusieurs produits à la fois).
- Pour le moyen terme (5 ans), il faut mettre en place des actions de recherche et développement permettant d'obtenir de fortes améliorations des outils techniques impliqués dans la fabrication des pulvérisateurs (augmenter des plages d'utilisations des buses pour pouvoir plus diminuer les doses appliquées).
- Pour la crédibilité de la démarche, des mesures immédiates (6 mois) telles que la mise en œuvre de référentiels concernant les techniques d'agriculture de précision et fondés sur des itinéraires techniques de référence par grandes productions à l'échelle du territoire avec l'ensemble des acteurs. En effet pour diffuser ces techniques il est nécessaire d'en démontrer l'efficacité tant du point de vue économique que technique (Jochinke et al, 2007)
Notre méthodologie peut-être transférée pour d'autres régions dans lesquelles des sols de limons sont caractérisés par un substratum qui induit des différences de profondeurs. Les potentiels de rendement en fonction de l'hétérogénéité des sols devant être définis au préalable pour que les simulations puissent être adaptées au nouveau référentiel pédoclimatique.
Les perspectives de ce travail sont de simuler les externalités environnementales telles que le potentiel de pollution à partir des excès de produits phytosanitaires.
Notre méthodologie ainsi que l'outil de simulation utilisé montrent qu'ils peuvent être utiles à plusieurs niveaux. Tout d'abord, pour les agriculteurs ou les conseillers agricoles pour évaluer la rentabilité de l'investissement en matériel pour moduler les intrants dans le cas d'exploitation qui voudraient se lancer dans l'application localisée des apports. Ensuite pour les constructeurs afin d'évaluer le potentiel de développement d'un matériel à l'échelle d'un territoire (ici la Normandie). Enfin, pour fournir des critères de décision économiques et environnementaux aux décideurs à l'échelle du territoire pour leur politique de soutien à des techniques permettant de réduire les doses de pesticides.

Conclusion

Notre méthodologie fondée sur la modélisation à partir de notre simulateur « Olympe » a démontré que l'intérêt économique de ces techniques n'est pas rentable pour la seule gestion des fongicides sur céréales mais qu'elle doit se concevoir dans la globalité de l'exploitation. En effet, dans les conditions pédoclimatiques de la Haute-Normandie, en appliquant la modulation des apports sur l'ensemble des intrants (engrais, fongicides et herbicides), on diminue leurs coûts à l'échelle du système de culture et on augmente la marge directe des cultures sans affecter le rendement. Ceci est particulièrement pertinent à une époque où le prix des intrants et l'insécurité alimentaire augmentent.

Au delà des importantes évolutions des pratiques agricoles mises en œuvre depuis une dizaine d'années, il est donc indispensable d'engager un mouvement de transformation en profondeur de l'ensemble de l'agriculture et de revisiter les bases de l'agriculture conventionnelle, pour concilier les impératifs d'efficacité économique, de robustesse au changement climatique et de réalisme écologique. Cette modernisation des pratiques de culture demande de rassembler les savoirs et savoir-faire de tous, de les confronter aux nouveaux défis et de les rendre plus efficaces par la recherche, l'expérimentation, l'échange et le transfert de connaissances. L'utilisation de l'agriculture de précision peut être une voie d'amélioration et notre ambition est d'être en mesure d'offrir un grand nombre de critères de décision pour les conseillers en agriculture, les industriels du machinisme et les décideurs politiques.

Remerciements :

Ce travail n'aurait pu se réaliser sans les essais expérimentaux aux champs réalisés par le GRCETA de l'Evreucin et Défisol27. Nous remercions tout d'abord les conseillers du GRCETA Vincent Debandt et David Mahieu pour leurs remarques et leur avis d'expert du conseil en agronomie. Ensuite, nous remercions Maxime Bécu et Charles Duval de Défisol27 pour les données techniques de description des sols et des systèmes de culture nécessaires à la pertinence de cette recherche.

Bibliographie

AGRESTE, (2010), bulletin de conjoncture.

Atherton B.C., Morgan M.T. Shearer S.A., Stombaugh T.S., Ward A.D., (1999), Site-specific farming : a perspective on information needs benefits and limitations. Journal of soil and water conservation 54 (2), 455-460.

Attonaty J-M., Le Bars M., Allaya M., Le Grusse P., 2005. Olympe : manuel d'utilisation. CIHEAM-IAM, Montpellier, France,

Bécu M., Duval C., Debandt V., Taïbi S. et LLorens J-M. (2008). Influence of the past history of the addition of fertilizers on the intra field variability of the rate of P and K in the soil: potential of site-specific fertilization. Ageng 2008 - International Conference on Agricultural engineering & Industry Exhibition. Hersonissos – Crete 23-25 June 2008, Greece.

Bourgain O., Michaud M., (2006). Evaluation of the economic impact of agricultural practices aiming at limiting muddy flows : farmers from the Plateau du Neubourg (France). Workshop « the socio-economic aspects in the management of soil erosion » Strasbourg, France 7th – 8th April 2006.

Bourgain O. and Llorens JM. (2009). Methodology to estimate economic levels of profitability of precision agriculture : simulation for crop systems in Haute-Normandie. In EFITA Conferences 09, Wageningen Academic publishers p. 91-98.

Burgos-Artizzua X. P., Ribeiroa A., Tellaecheb A.,Pajaresc G., C. Fernández-Quintanillad (2009). Improving weed pressure assessment using digital images from an

experience-based reasoning approach. Computers and electronics in agriculture 65, 176–185.
CER France, (2009). Gérer pour gagner, hors-série régional. 24 p.
Chambre d'agriculture Normandie, BCMA, CUMA, (2008), Coûts d'utilisation prévisionnels des matériels agricoles.
Brussaard, L., de Ruiter, P. C. and Brown, G. G. 2007. Soil biodiversity for agricultural sustainability. Agriculture, Ecosystems and Environment 121: 233–244.
Couleaud, G., (2009). Programme fongicide céréales – un investissement calqué sur le prix du quintal. http://www.terre-net.fr/dossier_special/Fongicides-Cereales-2009.
Dailey, A.G., Smith, J.U. and Whitmore, A.P. 2006. How far might medium-term weather forecasts improve nitrogen fertiliser use and benefit arable farming in the England and Wales? Agriculture, Ecosystems and Environment 117: 22–28.
DeVuyst, E. A. and Halvorson, A. D., (2004). Economics of Annual Cropping versus Crop–Fallow in The Northern Great Plains as Influenced by Tillage and Nitrogen. Agron. J. 96:148–153.
Duval C., Debandt V., Eveillé J-P., Mahieu D, Taïbi S., LLorens JM. (2007) Influence of the pedo-climatic variability in Haute-Normandie (NW France) on the intra field spatial variability on yields of wheat and oilseed rape. In Précision agriculture 07, Wageningen Academic publishers p. 87-94.
Fertil info (2009). special phyto 2010. Chambre d'agriculture de Seine-Maritime, 52p.
Grenelle de l'environnement (2007a). Synthèse du Groupe II – Préserver la biodiversité et les ressources naturelles. 7 pages.
Grenelle de l'environnement (2007b). Synthèse du Groupe III – Instaurer un environnement respectueux de la santé. 6 pages.
Grenelle de l'environnement (2007c). Synthèse du Groupe IV – Vers des modes de production et de consommation durables. 8 pages.
Jochinke, D. C., Noonon, B. J., Wachsmann, N. G. and Norton R. M. (2007). The adoption of precision agriculture in an Australian broadacre cropping system—Challenges and opportunities. Field Crops Research 104: 68–76.
Koch, B., Khosla, R., Frasier, W. M., Westfall, D. G. and Inman D. (2004). Economic Feasibility of Variable-Rate Nitrogen Application Utilizing Site-Specific Management Zones. Agron. J. 96:1572–1580.
Link, J., Graeff, S., Batchelor W. D. and Claupein W. (2006). Evaluating the economic and environmental impact of environmental compensation payment policy under uniform and variable-rate nitrogen management. Agricultural Systems 91: 135–153.
Lobell D.B. (2007). The cost of uncertainty for nitrogen fertilizer management: A sensitivity analysis. Field Crops Research 100: 210–217.
Melakeberhan, H. and Avendaño, F. (2008). Spatio-temporal consideration of soil conditions and site-specific management of nematodes. Precision Agric 9: 341–354.
Nordmeyer H. (2006). Patchy weed distribution and site-specific weed control in winter cereals. Precision Agriculture 7, 219–231.
Penot E. et Deheuvels. (2007) Modélisation économique des exploitations agricoles, Modélisation, simulation et aide à la décision avec le logiciel Olympe. Editions L'Harmattan. P. 9-21
Robert, P. C., (2002). Precision agriculture: a challenge for crop nutrition management. Plant and Soil 247: 143–149.
ROSACE, (2003) Réseau d'observation des systèmes agricoles pour les conseils et les études.

Sartori, L., Basso, B., Bertocco, M., Oliviero, G., (2005). Energy Use and Economic Evaluation of a Three Year Crop Rotation for Conservation and Organic Farming in NE Italy. Biosystems Engineering 91: (2) 245–256.

Slaughter D.C. Giles D.K., and Downey D. (2008). Autonomous robotic weed control systems: A review. computers and electronics in agriculture 61, 63–78.

Swinton SM, Lowenberg-DeBoer J , (1998), Evaluating the profitability of site-specific farming, Journal of precision agriculture 11 (4), 439-446